

前台阶流场的传热实验研究

兰州铁道学院 段欣然 美国德克赛尔大学 A · Baron 邹福康
美国国家科学基金会 李伟安

【摘要】 本文尝试用瞬态实验方法,在卢德威格风洞实验台上,对小台阶高度($H = 4.0\text{mm}$)的前台阶二维流场进行传热实验研究,测定了当雷诺数为11800至32200时的流场内热流通量和努谢尔特数的变化规律以及努谢尔特数随雷诺数变化的准则关系式。实验结果是令人满意的。

流体掠过一个直角表面的二维流场,在工程实践中有重要意义。图1是气流掠过前台阶二维流场的模型图。整个流场大致分为五个区域:主流,初始边界层,边界层分离区,台阶前部回流区和台阶后部回流区。边界层从主边开始形成和发展,在台阶以前开始分离,在下底面与迎流面之间形成第一个回流区,气流掠过台阶后在上部平面又形成第二个回流区。与后台阶流场相比,更为复杂。

本文尝试用瞬态实验方法,重点是

测定在两个回流区内热流通量的分布。这是在应用瞬态方法对后台阶二维流场进行了传热实验研究^[1]的基础上进行的。

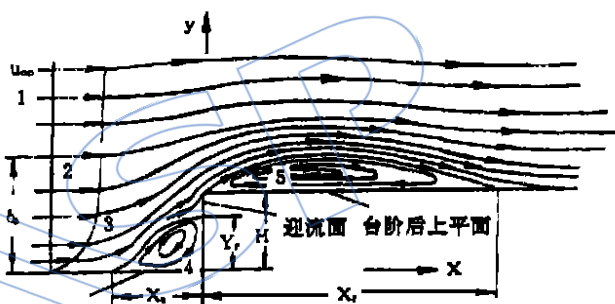


图1 气流掠过前台阶的二维流场 (1 主流; 2 初始边界层; 3 边界层分离区; 4 台阶前部回流区; 5 台阶后部回流区)

一、实验原理

1. 瞬态测热机理 实验中,用铂金属薄膜热流传感器进行瞬态测热。由于薄膜厚度很小,为微米数量级,而衬底材料较厚,为毫米数量级,两者之比非常小,故不影响对衬底材料表面温度的测定,应用一维半无限大平板导热理论^[2],通过薄膜表面的热流通量为

$$q_w(t) = \sqrt{\frac{\rho_c k}{\pi}} \left(\frac{T(t)}{\sqrt{t}} + \frac{1}{2} \int \frac{T(t) - T(\lambda)}{(t - \lambda)^{3/2}} d\lambda \right) \quad (1)$$

式中, t 为时间, $T(t)$ 为薄膜的瞬时温度与初始温度之差, ρ_c 、 k 分别为衬底材料的密度、比热和导热系数; λ 为虚拟积分变量。薄膜的瞬时电阻 $R(t) = R_0 + R_0 \alpha_k T(t)$, 式中 R_0 和 α_k 分别为薄膜的初始电阻和电阻温度系数。实验中通入热流传感器的电流 I_0 为恒稳电流,则薄膜两端的瞬

时电压与初始电压之差 $E(t) = I_0 R(t) - I_0 R_0 = I_0 R_0 \alpha_k T(t) = E_0 \alpha_k T(t)$, 则

$$T(t) = E(t) / E_0 \alpha_k \quad (2)$$

方程(1)经过进一步的简化, 以适合计算机进行数字处理, 在 $t_0 = 0$, $E(t_0) = 0$ 的条件下, 从(1)可以得到^[3]

$$q_w(t_n) = \frac{2}{\alpha_k E_0} \sqrt{\frac{\rho c k}{\pi}} \left[\sum_{i=1}^n \frac{E(t_i) - E(t_{i-1})}{\sqrt{t_n - t_i} + \sqrt{t_n - t_{i-1}}} \right] \quad (3)$$

2 利用膨胀波后准定常气流 文献[4]详细讨论了瞬态实验方法的基本原理和有关的激波理论以及在卢德威格风洞里是利用膨胀波后的气流进行实验。从示波器所拍摄的图片可知, 有效工作时间, 即在该风洞中从高压管端部最先反射回来的膨胀波前与膨胀波尾相遇前的时间间隔, 大约为 20ms。在此期间, 气流可视作准定常气流。

瞬态方法的突出优点之一是可以应用等壁温条件, 在 10ms 的时间间隔中, 壁面温度变化仅约 0.1。这说明简化为等壁温是可以的。根据对流换热方程

$$q_w = h(T_w - T_\infty) \quad (4)$$

这里认为壁面温度 T_w 恒定, 只需测出 q_w 以及压力 p 的瞬时平均值, 根据等熵流动方程组就可算出主流瞬时平均温度 T_∞ , 进而计算出壁面局部传热系数 h 。

二、实验系统

图 2 为美国费城德克赛尔大学机械与力学系卢德维格风洞实验台系统。风洞由高压供气管、实验段及低压排气管等三部分组成。

实验时, 低压排气管为真空状态, 改变高压供气管内的压力, 就可得到不同雷诺数的实验条件。

实验段是用厚铝板加工而成的, 安装在高压供气管与低压排气管之间。主边处有边界层抽气管, 以保证边界层在台阶处发展为完全紊流状态。实验段结构如图 3 所示。

测试设备采用圆型热流传感器和石英压电晶体压力传感器, 频响时间均为

1μs, 分别嵌装在实验段上、下表面上, 安装位置见表 1。热流传感器都进行了标定, 以保证实验的准确度^[5]。

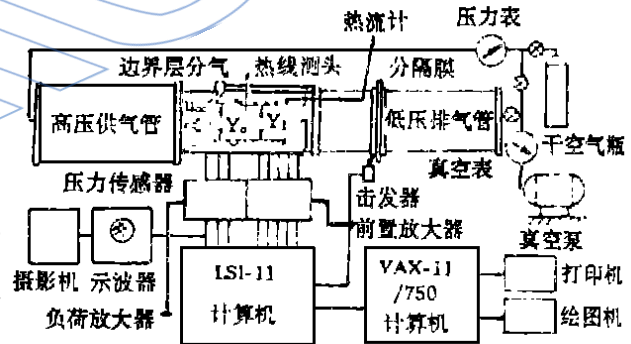


图 2 卢德维格风洞实验系统

表 1 测量仪表的位置

仪 表 位 置	热 流 传 感 器						压 力 传 感 器	
	H ₉	H ₂	H ₃	H ₄	H ₆	H ₇	P ₁	P ₅
X ₀ ' (mm)	- 4.5	4.5	12.0	24.0	75.0	135.0	- 25.4	88.9
X ₀ '/H	- 1.125	1.125	3.0	6.0	18.75	33.75	- 6.35	22.23

实验由 LSI-11 微型计算机控制和采集数据, 由 VAX-11/750 计算机系统进行处理, 最后打印出结果和绘图。对整个实验系统的详尽说明可参阅文献[4]。

三、小台阶的测试方法

对于小台阶高度的流场, 传热测量中有许多技术困难。由于台阶高度仅 4mm, 热流传感器无法安装在迎流面上, 即便安装在下底面上, 亦不可能太靠近台阶。本实验采用台阶粘贴附加物的方法, 变换坐标, 从而改变测点的相对位置。

图 3 中, 当台阶附加厚度为 A 时, 新坐标系为 $O'X$, 原点 O' 在新台阶处, 而原坐标系 $O'X$ 的原点在 O 处, 即不粘贴附加物时的台阶初始位置。附加物用轻质、光滑材料制成, 需保证安装时与表面齐平。粘贴附加物后, 传感器在新坐标系中的位置为

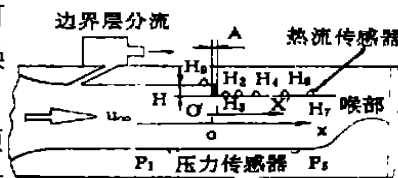


图 3 实验段结构示意图

$$x = A + x_o' \quad (5)$$

式中 x_o' 为传感器的安装位置 (表 1), A 的值分别为 1.85、2.60、3.00、3.60、4.00 (mm)。

离台阶处的无量纲距离

$$x/H = A/H + x_o'/H \quad (6)$$

以传感器 H_9 为例, 其安装位置距台阶的相对距离为 -1.125, 当依次采用五种附加厚度时, 则在新坐标系中的相对距离分别为 -0.663, -0.475, -0.375, -0.225 和 -0.125。这样, 就增多了测量点。由于最大附加厚度与主边到台阶的距离相比, 小于 1.65%, 因此, 这种变换坐标的测试方法不致影响到边界层的充分发展。实践表明该方法是行之有效的。

四、实验结果分析

实验参数: 台阶高度 $H = 4.0\text{mm}$, 实验段扩展比 $y_1/y_0 = 0.913$, 马赫数 $M_a = 0.21$, 雷诺数 $Re_H = 11800 \sim 32200$ 。

1. q_w 的测定

(1) 台阶后上部回流区 图 4 显示了 q_w 在该回流区的分布。其中图 (a) 是绘图机绘出的原图, 图 (b) 是所有实验数据平均的结果。

从图 (a) 中可看出, 在五种不同的雷诺数实验条件下, 分成五个依次随雷诺数增大的数据带 (图中有剖面线部分)。雷诺数愈小, 一般重复性愈好, 以 Re_H 分别为 11800 和 17500 时的情况最为明显。

从图 (b) 可以看到 q_w 从近台阶处的初始值开始增大, 直到最大峰值, 然后再减小的变化规律。在 $x/H < 5$ 的范围内, 迅速增大到峰值, 然后又迅速减小; 在 $5 < x/H < 10$ 的范围内, 减少得慢一些, 曲线较缓; 在 $x/H > 10$ 的区域, 曲线平缓, 变化很小, 接近平板紊流的数值。此外, 如与后台阶流场进行比较, q_w 值较大。以 $Re_H = 32200$ 为例, 此时最大值 q_{wmax} 达到 $0.7w/\text{cm}^2$, 而此雷诺数时后台阶流场的 q_{wmax} 的值大约为 $0.55w/\text{cm}^2$ 。从图中可以发现, 对于各种不同雷诺数而言, 热流通量的最大值均位于 $x/H = 2.5$ 处, 即再结合点位于离台阶 2.5 个台阶高度的位置。

由于最靠近台阶的传感器 H_2 位于 $x/H = 1.125$ 处, 因此在 $x/H < 1.125$ 时, 即在距台阶最近的 1 个稍多台阶高度范围内, q_w 的变化情况还不清楚。

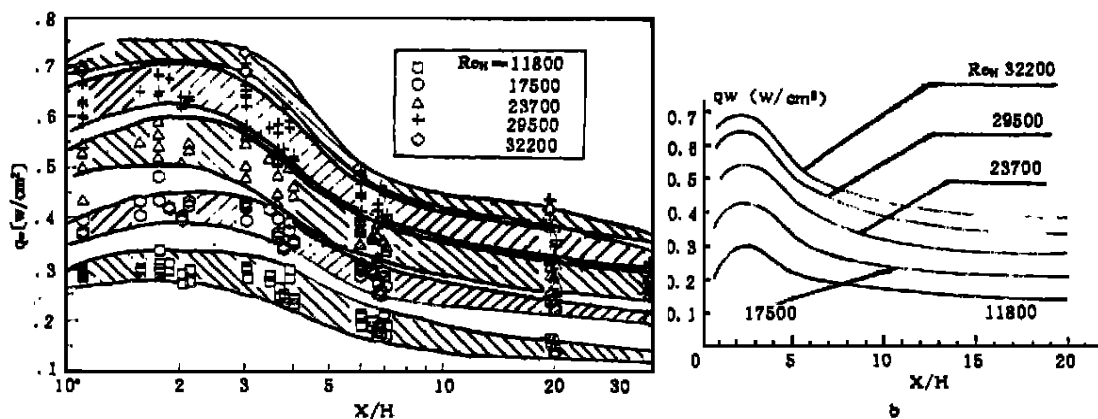


图 4 热流量在台阶后上部回流区的分布 (a: 原始实验数据; b: 平均实验数据)

(2) 台阶前下部回流区 图 5 是 q_w 在该回流区的分布图。图中 $x/H < -0.5$ 时, 即离台阶半个台阶高度以外的范围内, 数据波动不大, 较平缓; $x/H > -0.5$ 时, 即离台阶半个高度区域内, q_w 增大得很快, 达到最大值, 然后再减小。在雷诺数较大时, 这种变化趋势更为明显, 如 Re_H 分别为 29500 和 32200 的情况。

q_{wmax} 的位置不固定, 大约在 x/H 为 $-0.1 \sim -0.2$ 的范围内。 $Re_H = 11800$ 时, $q_{wmax} = 0.19 \text{ W/cm}^2$, 位于 $x/H = -0.2$ 处; $Re_H = 32200$ 时, $q_{wmax} = 0.52 \text{ W/cm}^2$, 位于 $x/H = -0.1$ 处。可以看到这样一个趋势: 随雷诺数的增大, q_{wmax} 的位置向右移动, 即愈靠近台阶。

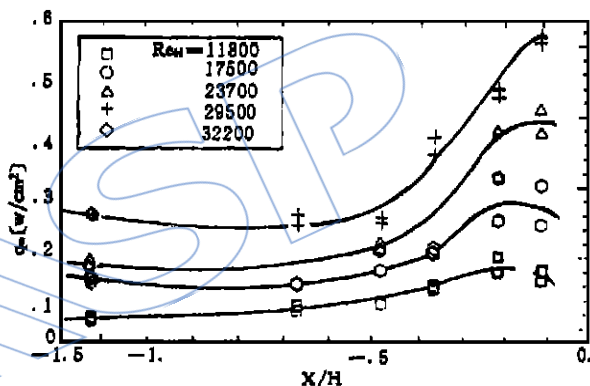


图 5 热流量在台阶前下部回流区的分布

2 努谢尔特数 N_{UH} 的变化规律

图 6 是整个流场的 N_{UH} 随 x/H 变化的关系, 左图是台阶前部回流区, 右图是台阶后部回流区, 放在一起便于比较, 但二者横坐标比例不同。左半图中, 在很小的区域内流动变化剧烈, 故比例尺放大到十倍。以 $Re_H = 17500$ 为例, N_{UH} 从某一初始值开始减小, 直到最小值, 然后迅速增大, 到最大值后再减小。在右半图中, 在近台阶处数据点密集, 而在远离台阶的地方, 如 $x/H > 30$ 的区域, 数据点明显随雷诺数的增大而依次排开。

3 准则方程式

整个流场中, N_{UH} 与 Re_H 的关系见图 7。 N_{UH} 随 Re_H 变化的规律可整理为下列准则方程

$$N_{UH} = a \cdot Re_H^b \quad (7)$$

式中系数 a 为常数, 很容易确定; 幂指数 b 随 x/H 的不同而变化, 详见 (表 2)。

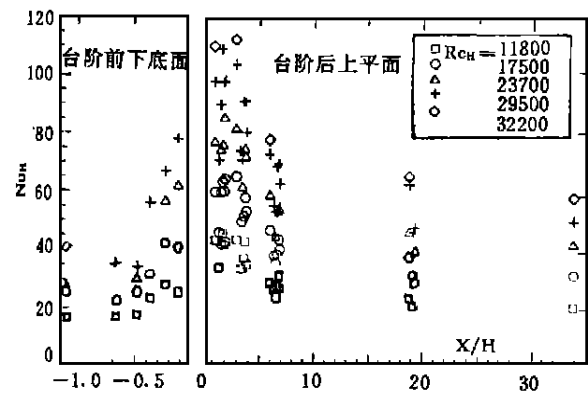


图6 Nu_H 与 X/H 的关系

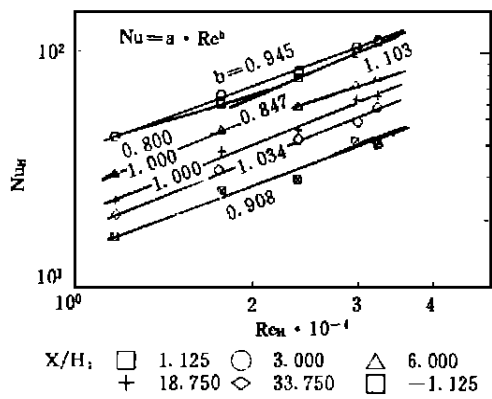


图7 Nu_H 与 Re_H 的关系

表2 幂指数 b 的值

X/H	-1.125	1.125		3.0	6.0		18.75	33.75
		$Re_H < 2.2 \times 10^4$	$Re_H > 2.2 \times 10^4$		$Re_H < 1.8 \times 10^4$	$Re_H > 1.8 \times 10^4$		
b	0.908	0.800	1.103	0.948	1.000	0.847	1.000	1.034

综上所述得出如下结论: (1) 本文用瞬态方法对前台阶二维分离流场进行传热实验研究, 所得实验数据合理可靠, 为该流场的研究提供了新的手段和途径。(2) 对于小台阶高度的流场, 本实验采用加贴台阶附加物的方法, 获得了台阶前下底面上 q_w 的分布规律。(3) 通过实验, 得到在台阶后上平面回流区及台阶前下底面回流区, q_w 随 Re_H 和 q_w 随 x/H 的变化规律。(4) 本文还提出了 Nu_H 随 x/H 的分布规律, 以及换热准则方程式。

参 考 文 献

[1] 段欣然, 陈时钧, 邹福康, 葛绍岩, “应用瞬态方法对气流掠过后台阶二维流场的传热实验研究”, 工程热物理学报, 第9卷, 第4期, 1988年。

[2] Schultz, D. L. and Jones T. V. , “Heat-transfer Measurements in Short-duration Hypersonic Facilities”, A GARD-AG-165, 1973

[3] Tsou, F. K., Chen, S. J., Ko, S. Y., “Measurements of Heat Transfer Rates Using a Transient Technique”, ASME Paper, 83-HT-87, 1983

[4] 段欣然, 邹福康, 陈时钧, “短周期流动装置中的传热实验研究”, 兰州铁道学院学报, 第7卷, 第2、3期合刊号, 1988年。

[5] Duan Xinran, Chen, S. J., Tsou, F. K. “An Electric Heating Calibration Method of the Thin Platinum Film Heat Flux Gauge”, Proceedings of the Second International Symposium on Heat Transfer, Beijing, China, 1988

heating conditions. As a result, the best flow pattern for the heat exchange coefficient in which the annular flow zone is the longest without "burn down." Then the empirical formulas have been found for designing. The results of numerical calculation are in good agreement with the data of tests.

MEASURING TECHNIQUE FOR INFRARED RADIATION OF METALLIC SURFACES

Ren L inghua, Zhen Jirui, LeiYing

(Nanjing Aeronautical Institute)

ABSTRACT A testing principle, method and apparatus for measuring infrared radiative energy of metallic surfaces are presented. The infrared radiation characteristics of irons and stainless steels have been investigated experimentally. The effects of the temperature on the infrared radiative energy of metal materials are considered. The experimental results illustrate that this testing technique is applicable and the measuring apparatus is reliable.

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN TURBULENT SEPARATED FLOW OVER A FORWARD-FACING STEP

Duan Xinran

(Lanzhou Railway Institute)

A. Baron and F. K. Tsou

(Drexel University, Philadelphia, U. S. A.)

W. Aung

(National Science Foundation, Washington, DC, U. S. A.)

ABSTRACT An experimental study of heat transfer in turbulent separated flow over a forward-facing step is reported in this paper. The present work deals with a quite small forward-facing step model (step height $H = 4.0 \text{ mm}$), therefore a special technique that can change the relative locations of heat flux gauge from the step is applied successfully.

The investigation is focused on two recirculation zones. Measurements of heat transfer are performed in Ludwig Wind Tunnel by the transient technique, which demonstrates a new method of experimental research in this field. Within the range of Reynolds number 11800 to 32200, the distribution of wall heat flux and the distribution of Nusselt number are obtained. Those distributions show that the heat transfer coefficient increases to the first maximum value near the step in the front recirculation zone and the second maximum occurs at the reattachment point in the downstream recirculation zone where this point is fixed roughly at $X/H = 2.5$ for the five different Reynolds numbers. The second maximum is larger than the first for same Reynolds number. At last a correlative equation

between Reynolds and Nusselt numbers is presented.